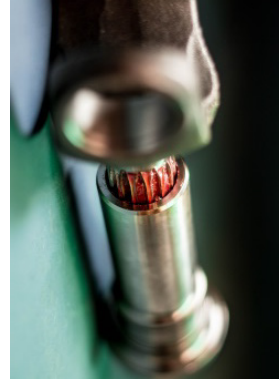


# Potential moderner Schmierstoff- und Beschichtungssysteme am Beispiel axial bewegter Zahnwellen-verbindingen

Schmelter, R.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.

*Moderne Schmierstoff- und Beschichtungssysteme können laut Herstellerangaben die Reibung und den Verschleiß in bewegten Kontakten reduzieren. Am Beispiel axial verschiebbarer Zahnwellenverbindungen soll in diesem Artikel der Nachweis dieser Behauptung nachgegangen werden.*



*Modern tribological systems (greases and coatings) promise to reduce friction and wear in moving contacts. To prove this thesis, experimental investigation on spline shafts under axial motion were done by the authors.*

## Einleitung

Eine ständige Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Gelenkwellen durch Steigerung der Drehzahlen und/oder übertragbaren Drehmomente erzeugten bei gleichzeitiger axialer Bewegung im Längenausgleich ebenso steigende Anschlusskräfte wie Belastungen der Wellenabschnitte. Diese Kräfte sind stark von dem in den Kontaktstellen von Wellenverzahnung und Nabenverzahnung auftretenden Reibwert abhängig. Bei den bisher an dieser Schnittstelle verwendeten Schmierstoffen und Beschichtungen existiert, in Abhängigkeit vom Anwendungsfall, noch deutlicher Optimierungsbedarf. Daher liegt der Fokus in den aktuellen Untersuchungen auf der Eignung anderer Schmierstoff- und Beschichtungsvarianten zur Reduzierung der Reibwerte und des Verschleißes. Der Versuchsumfang besteht dabei aus sechs verschiedenen Schmierstoffen sowie vier Beschichtungen die mit Schmierstoff 1 geschmiert eingesetzt werden. Einen Überblick über die grundlegenden Eigenschaften der Produkte gibt Tabelle 1. Untersuchungsobjekt ist der verzahnte Längenausgleich einer Gelenkwelle.

Der verzahnte Längenausgleich wird dazu in einem eigens aufgebauten Prüfstand /1/ durch ein Torsionsmoment von 500Nm belastet und axial mit einer Frequenz von 1Hz und einem Verschiebeweg von 1mm bewegt. Die Belastung erfolgt dabei in einem zeitlichen Verhältnis von 60/40 (36s/24s) Belastung/Entlastung. Durch diese Verfahrensweise soll sich die Schmierstoffverteilung im Zahnkontakt wieder normalisieren. Eine dauerhafte Verspannung führt zu einem Klemmen der Verzahnung nach relativ kurzer Versuchsdauer.

Tabelle 1: Überblick der getesteten tribologischen Systeme

System	Eigenschaft
Schmierstoff 1	Lithiumverseiftes Mehrzweckfett mit EP Eigenschaften
Schmierstoff 2	Lithiumverseiftes Mehrzweckfett mit EP Eigenschaften
Schmierstoff 3	Lithiumseifenfett auf Syntheseölbasis mit weißen Festschmierstoffen
Schmierstoff 4	Fettpaste auf Basis eines Kalzium-Komplex Grundfettes mit weißen Festschmierstoffen
Schmierstoff 5	Lithiumverseiftes Fett auf Mineralölbasis mit weißen Festschmierstoffen
Schmierstoff 6	Lithiumverseifte Schmierpaste auf Syntheseölbasis mit weißen Festschmierstoffen
Beschichtung 1	Fluorpolymerbeschichtung mit Einlagerungen von Molybdän
Beschichtung 2	Hitzehärtender Gleitlack
Beschichtung 3	Semi-Kristalline Polymerbeschichtung
Beschichtung 4	Fluorpolymerbeschichtung mit Einlagerungen von Verstärkungsstoffen

Tabelle 2: technologische Daten Prüfverzahnung

Norm	DIN5480
Zähnezahl $z$	14
Modul $m$	2mm
Bezugsdurchmesser $d_B$	32mm
Überdeckungslänge	48mm ( $\approx 1,5 \times d_B$ )
Eingriffswinkel $\alpha$	30°

## Versuche und Auswertung

Wichtige Kriterien für die Charakterisierung des Verschleißverhaltens sind das sich im Versuch ergebende Knickspiel in der Verzahnung sowie die Zunahme des Verdrehspiels. Das Knickspiel wird gemäß Abbildung 1 in einer separaten Vorrichtung vor und nach jedem Versuch gemessen. Ausgewertet wird die Vergrößerung des Knickspiels bezogen auf die erreichte Anzahl Verschiebungen der Probe. Die Verdrehspielmessung ist in Abbildung 2 dargestellt, über eine Messuhr wird der Verdrehweg zwischen Welle und Nabe im Abstand von 40mm zur Bauteilachse bei einer Belastung von  $\pm 50\text{Nm}$  gemessen.

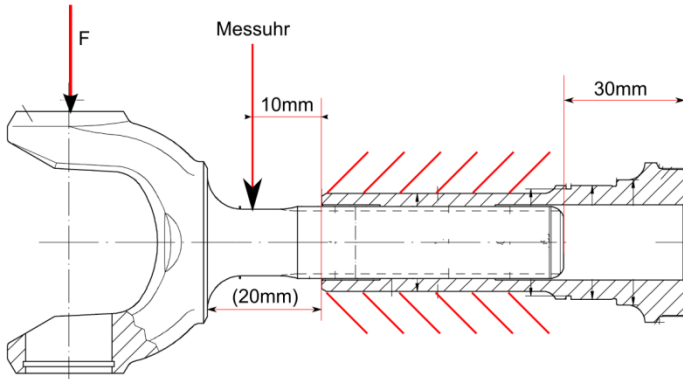


Abbildung 1: Prinzipskizze Knickspielmessung

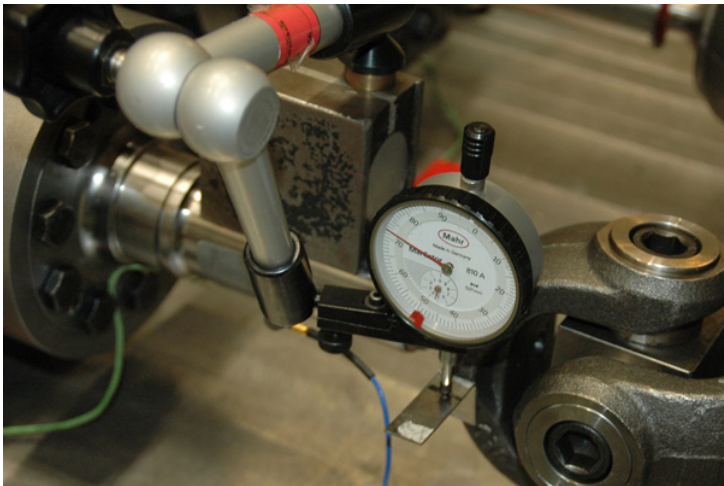


Abbildung 2: Aufbau Verdrehspielmessung

Eine weitere wichtige Messgröße ist die axiale Verschiebekraft, die zur Bewegung der ZWV unter Torsionsbelastung notwendig ist. Dazu gibt es für jede Probe im Prüfstand eine Axialkraftmessstelle. Die Axialkräfte werden dann mit Formel 1 (nach /2/) und den Geometriedaten aus Tabelle 2 in einen bauteilspezifischen Reibwert umgerechnet.

$$\mu = \frac{F_{ax}}{T} \cdot \frac{d_B}{2} \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

Darin sind:

- $F_{ax}$  – axiale Verschiebekraft [N]
- $T$  – Verspannmoment [Nm]
- $d_B$  – Bezugsdurchmesser der Verzahnung
- $\alpha$  – Eingriffswinkel

Für die grundlegende Betrachtung der Eigenschaften des tribologischen Systems ist es ausreichend, den Versuch bei Reibwerten von ca. 0,2 und größer abubrechen.

### Erreichte Lastwechselzahl

Nur wenige Proben erreichen im Versuch die tatsächlich anvisierte Lastwechselanzahl von 10e6 Verschiebungen. Tatsächlich sind deutliche Unterschiede bei den erreichten Lastwechselzahlen für die einzelnen Schmierstoffe und Beschichtungen zu sehen, damit eignet sich der Ausfallzeitpunkt der Proben schon als Merkmal für die Eignung als tribologisches System im Längenausgleich. In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind für die verschiedenen eingesetzten Schmierstoffe und Beschichtungen die erreichten Lastwechselzahlen angegeben. Bei den Schmierstoffen (Abbildung 3) gibt es lediglich eine Variante die zuverlässig hohe Lastwechselzahlen ermöglicht.

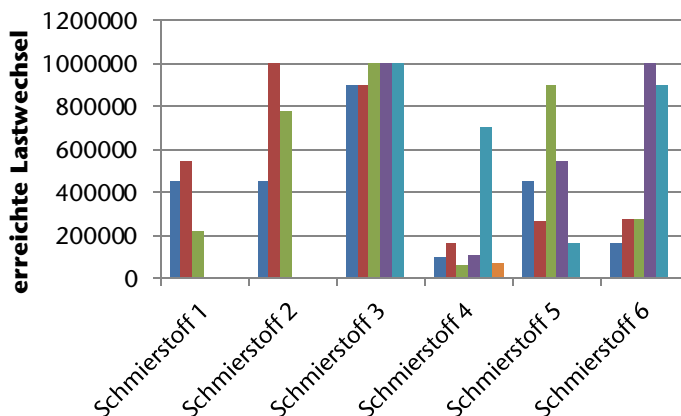


Abbildung 3: Erreichte Lastwechsel für die einzelnen Schmierstoffe

Im Gegensatz dazu erreichen die beschichteten Proben alle eine relativ hohe Anzahl Lastwechsel, allerdings wird das Ziel von 10e6 Lastwechseln nicht immer

erreicht. Einzig die Beschichtung 3 ist zuverlässig genug für alle Proben diese Lastwechselzahl und sogar noch wesentlich mehr Lastwechsel zu ermöglichen. Beschichtung 4 ist ebenfalls recht zuverlässig, allerdings ist bei dieser auch ein Frühausfall zu berichten.

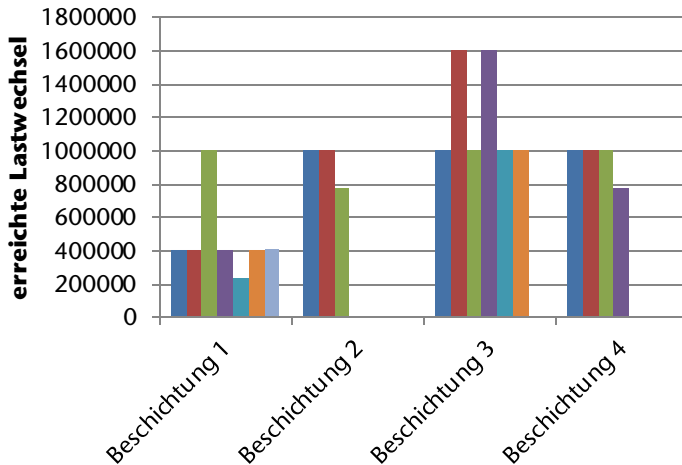


Abbildung 4: Erreichte Lastwechsel für die einzelnen Beschichtungen

### Verschleißmessungen

Das Verdrehspiel in der Zahnwellenverbindung ist ein Verschleißindikator und kann während der Versuche im Prüfstand gemessen werden. Die Verdrehspielzunahme ist definiert als Verdrehspiel zum Zeitpunkt X minus des Verdrehspiels zu Versuchsstart.

In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind für die geschmierten und die beschichteten Proben die Entwicklungen der Verdrehspiele dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass durch die Ausfallrate der geschmierten Proben bei diesen zum Großteil nur Einzelergebnisse dargestellt werden können. Lediglich für Schmierstoff 3 ist eine Angabe über mehrere Proben möglich.

Bei den beschichteten Proben erfolgte der Ausfall wesentlich später als bei den geschmierten Proben, darum sind in Abbildung 6 die mittleren Verdrehspielzunahmen über die Versuchsdauer mit entsprechender Standardabweichung dargestellt.

Bei Beschichtung 1 ist ein Großteil der Proben relativ früh ausgefallen, über die Verdrehspielzunahme bei höheren Lastwechselzahlen kann daher keine Aussage getroffen werden.

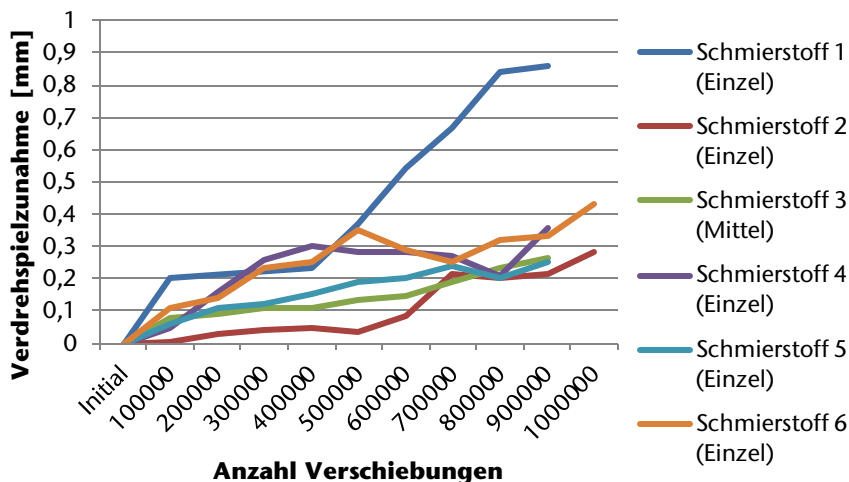


Abbildung 5: Verdrehspielzunahme der Schmierstoffproben

Die mit Beschichtung 2 versehenen Proben sind alle mit Vorschädigung im Versuch gestartet. Bei diesen Proben ist die Verzahnung im Bereich der Zahnköpfe angeschlagen und z.T. lokal verformt wurden, dadurch wurde ein lokales Nacharbeiten der Verzahnung notwendig wodurch an diesen Stellen die Beschichtung entfernt wurde. Die mittlere Verdrehspielzunahme dieser Proben verläuft annähernd linear steigend aber mit sehr großer Streuung der Ergebnisse.

Für Beschichtung 3 und 4 sind die mittleren Verdrehspielzunahmen relativ gering mit geringer Streuung. Im Vergleich zu den Schmierstoffuntersuchungen ist eine Reduzierung des Verschleißes um ca. 30% und mehr zu erkennen.

Eine weitere wichtige Größe, um den Verschleiß in einer Zahnwelle, besonders im Augenmerk auf die Anwendung in Gelenkwellen, größtmäßig zu charakterisieren ist das Knickspiel in der Verbindung. Da jedoch die verschiedenen Proben zu unterschiedlichen Zeiten ausgefallen sind, ist eine Aussage über das absolute Knickspiel nicht zielführend. Daher werden die Knickspielzunahmen über den Versuch auf die erlebte Lastwechselzahl bezogen, um ein relatives Maß zu erhalten. Die relativen Knickspielzunahmen sind in Abbildung 7 dargestellt. Ebenfalls eingetragen sind die minimalen und maximalen Knickspielzunahmen die erreicht wurden.

Gute Schmierstoffe und gute Beschichtungen erreichen bei der relativen Knickspielzunahme annähernd gleiche Werte wie auch gleichwertige Schwankungen der Ergebnisse. Allerdings muss beachtet werden, dass im Mittel die beschichteten Proben längere Standzeiten erreicht haben als die meisten

Schmierstoffproben. Die Ergebnisse der Knickspielmessung spiegeln somit nicht zwingend die Ergebnisse der mittleren Verdrehspiele wieder.

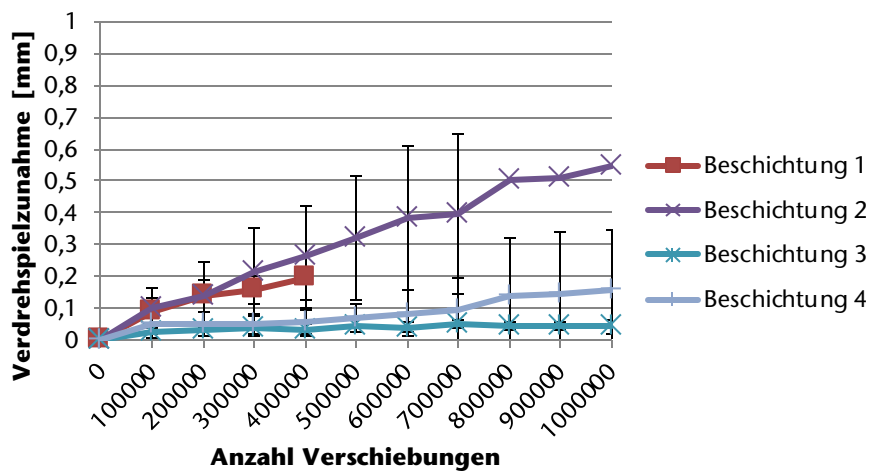


Abbildung 6: Verdrehspielzunahme der Beschichtungsproben mit Standardabweichung ermittelt aus mehr als drei Einzelwerten

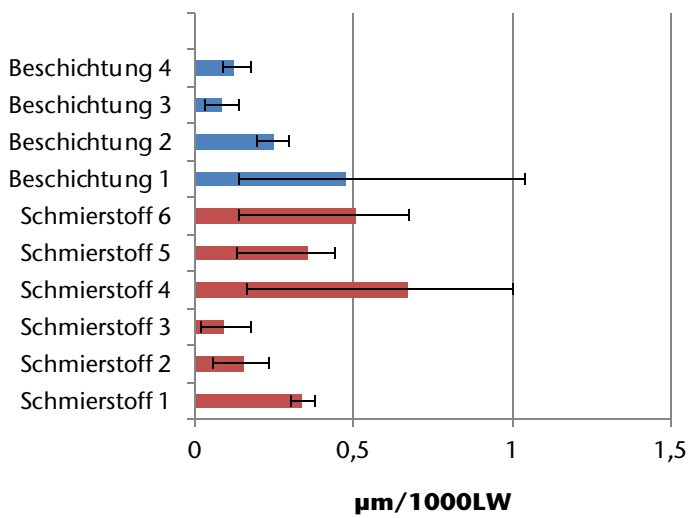


Abbildung 7: mittlere Knickspielzunahme pro 1000 Lastwechsel

## Reibwerte

Ein wichtiges Ziel der Untersuchungen ist, die Reibwerte in der Zahnwellenverbindung bei axialer Verschiebung zu reduzieren. In Abbildung 8 sind für die einzelnen getesteten Schmierstoff- und Beschichtungsproben die gemittelten Reibwerte bei Versuchsbeginn (Initial) und während des Prüflaufs (Mittel) angegeben. Für die Ermittlung der gemittelten Reibwerte im Betrieb wird nur der Bereich annähernd konstanter Reibwerte (vgl. Abbildung 9) herangezogen.

Die mit Schmierstoff 2 und 5 geschmierten Proben erreichen im Mittel einen Reibwert im Betrieb von ca. 0,09, für Schmierstoff 3 lässt sich ein mittlerer Reibwert von ca. 0,1 angeben. Für Schmierstoff 4 kann kein mittlerer Reibwert angegeben werden, da dieser Schmierstoff schon während des ersten Lastwechsel versagt und Reibwerte von größer 0,2 erreicht werden. Allgemein liegen die meisten Schmierstoffe bei den Reibwerten relativ nahe beisammen, eine deutliche Reibwertreduzierung im Vergleich zu Schmierstoff 1 kann nicht erkannt werden.

Ein anderes Bild hingegen zeigt sich, wenn man die Beschichtungen betrachtet. Die besten Ergebnisse erzielen dabei Beschichtung 3 und Beschichtung 4. Mit Beschichtung 3 kann der Reibwert im Kontakt dauerhaft auf ca. 0,025 gesenkt werden, Beschichtung 4 ermöglicht immerhin noch eine Reibwertreduzierung auf ca. 50% der Werte für Schmierstoff 1. Die anderen getesteten Beschichtungen zeigen hingegen kein deutlich besseres Bild als die Schmierstoffe.

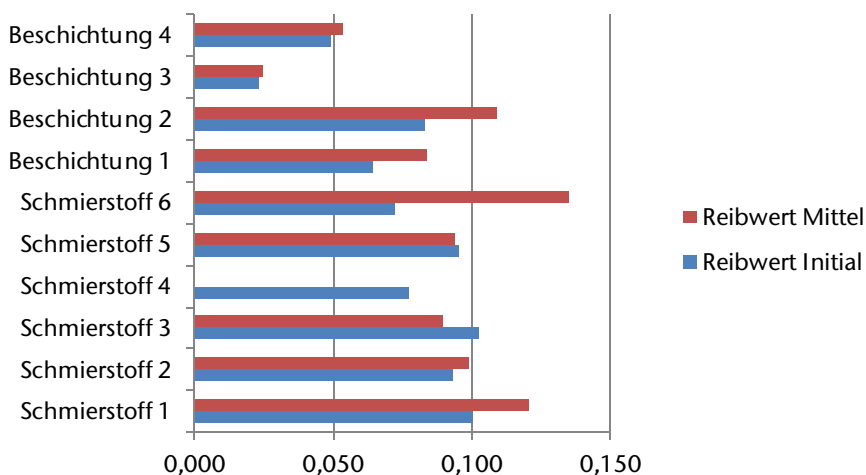


Abbildung 8: Initialer und mittlerer Reibwert für die einzelnen tribologischen Systeme



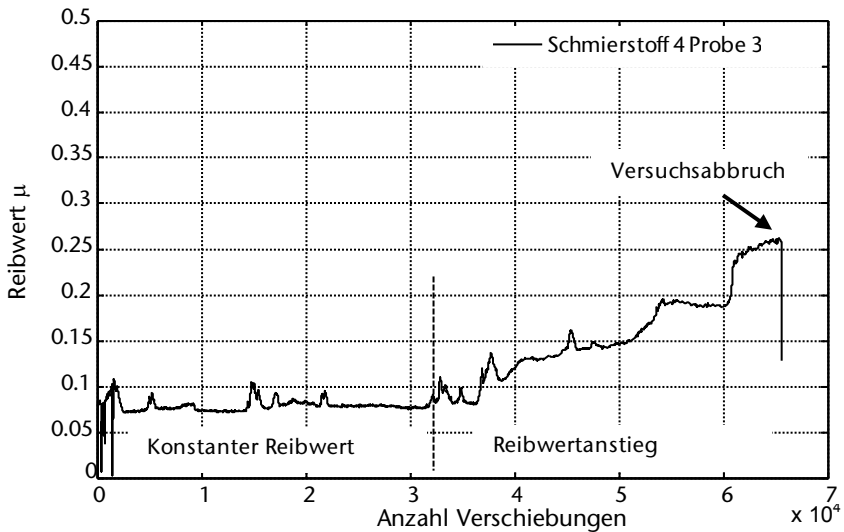


Abbildung 9: Beispielhafter Verlauf der Reibwertentwicklung für Schmierstoff 4, Probe 3

## Zusammenfassung

Moderne Beschichtungs- und Schmierstoffsysteme können zuverlässig Reibwerte und Verschleiß reduzieren wie hier am Beispiel von axial verschiebbaren Zahnwellenverbindungen, wie sie z.B. in Kreuzgelenkwellen zum Einsatz kommen, im Versuch aufgezeigt. Es konnten zwischen den getesteten Schmierstoffen und Beschichtungen zum Teil erhebliche Unterschiede in der Eignung für diesen Anwendungsfall nachgewiesen werden. Als besonders gut geeignet für die Anwendung in Zahnwellenverbindungen kann Schmierstoff 3 sowie Beschichtung 3 und 4 genannt werden, wobei Beschichtung 3 das beste Ergebnis mit einer Reibwertreduzierung von über 70% gegenüber Schmierstoff 1 erzielte. Allerdings ist Beschichtung 4 hitzebeständiger, wodurch diese in Umgebungen mit höheren Temperaturen noch eingesetzt werden kann. Außerdem benötigt Beschichtung 4 keine Nachbearbeitung, dadurch können im Vergleich zu Beschichtung 3 Fertigungskosten eingespart werden.

## Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung, sowie bei der AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung des Projekts „Reibwert- und Verschleißreduzierung im Gelenkwellen-Längenausgleich“ (FVA Nr. 505II, IGF Nr. 17142 N/1).

## Literatur

- /1/ Schmelter, R.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Verschleiß in axial bewegten Zahnwellenverbindungen – Prüfstand zur experimentellen Ermittlung von Reibwerten und Verschleißkennwerten, Institutsmitteilung Nr. 39, IMW Clausthal 2013
- /2/ Seherr-Thoss, H.-C. v.; Schmelz, F.; Aucktor, E.: Gelenke und Gelenkwellen: Berechnung, Gestaltung, Anwendungen. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2002.